

Rhéologie des bétons autoplaçants

Évaluation de la thixotropie

Zahia TOUTOU

Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Michel CADOR

Laboratoire régional de l'Est parisien, Le Bourget

Nicolas ROUSSEL*

Laetitia D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Éric VILBÉ

Laboratoire régional de l'Est parisien, Le Bourget

Robert Le ROY

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet national béton autoplaçant, le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées a proposé et testé des méthodes de caractérisation de la thixotropie sur chantier. Les notions de rhéologie nécessaires à la compréhension du phénomène de thixotropie sont d'abord rappelées. Le chantier expérimental de Guerville est ensuite présenté. Le programme d'essais réalisé et les résultats obtenus sont décrits. L'existence d'un phénomène de structuration (ou floculation) dû à la thixotropie est constatée. Il apparaît également que la mesure de « l'amplitude » de cette structuration n'est pas suffisante pour décrire les variations de rhéologie des bétons autoplaçants (BAP), mais que la cinétique d'évolution du phénomène joue aussi un rôle important. Selon les protocoles d'essai adoptés, la part « structuration » peut ou non être dissociée de la part « vieillissement » du matériau. Des indices permettant de quantifier les deux phénomènes sont définis.

DOMAINE : *Ouvrages d'art.*

ABSTRACT

*RHEOLOGY OF SELF-COMPACTING CONCRETES:
EVALUATION OF THIXOTROPY*

Within the scope of the national self-compacting concrete project, the Ponts et Chaussées network of laboratories has proposed and tested methods for characterizing thixotropy on worksites. The rheological notions necessary to understanding the phenomenon of thixotropy will first be recalled. The experimental site at Guerville will be presented next. The complete testing program, along with the set of results obtained, will also be discussed. The existence of a structural pattern (or flocculation) phenomenon due to thixotropy has been observed. It would also appear that the "amplitude" measurement of this structural pattern is not adequate for describing the rheological variations in self-compacting concretes (SCC), but that the evolution kinetics of the phenomenon also play a key role. Depending on the test protocols adopted, the "structural" part might or might not be dissociated from the "aging" part of the material. Indices making it possible to quantify both phenomena have also been defined.

FIELD: Structural engineering.

INTRODUCTION

Les bétons autoplaçants (BAP) sont voués à un essor important tant en France qu'à l'étranger. En effet, ces matériaux, qui ont été conçus au Japon dans le but de couler des pièces fortement ferrillées, des pièces de géométrie complexe ou situées dans des zones difficilement accessibles, sont extrêmement fluides et se mettent en place sous leur propre poids sans apport de vibration. Ils sont bien sûr utilisés dans la réalisation de dallages ou de voiles de grande hauteur, du fait de la limitation du nombre de reprises de bétonnage. Par ailleurs, l'emploi de superplastifiants de plus en plus élaborés et le plus souvent associés à des agents viscosants leur confère un caractère thixotrope particulièrement marqué. La thixotropie (qui sera définie plus en détail plus bas) se manifeste en particulier par une « structuration » (ou floculation) de la pâte de ciment lors d'un repos ou d'un écoulement lent du béton. Ce phénomène entraîne une diminution réversible de l'ouvrabilité du matériau. Un tel phénomène constitue à la fois un avantage et un inconvénient dans le cas des BAP.

* Auteur à contacter pour toute correspondance.

Il présente l'avantage d'empêcher la ségrégation statique des plus gros grains et également de limiter les contraintes de poussée sur les coffrages. En revanche, dans le cas d'une mise en œuvre particulièrement lente, la thixotropie présente l'inconvénient de réduire la propriété d'« auto-mise en place » du matériau. Une meilleure maîtrise de ces phénomènes contribuerait à l'optimisation des conditions de mise en œuvre de ces nouveaux bétons.

Le projet national B@P, qui réunit la profession du génie civil autour de ce matériau, a pour objectif d'accompagner le développement des BAP. Dans ce cadre, on souhaite « approfondir les connaissances, améliorer ou mettre au point des essais et rédiger des recommandations pour leur contrôle et leur mise en œuvre ». Parmi ces préoccupations, l'interaction thixotropie-poussée sur les coffrages a été étudiée lors d'un chantier expérimental. Le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC), en tant que partenaire de ce projet, et plus particulièrement la division « Bétons et composites cimentaires » du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) ainsi que le Laboratoire régional de l'Est parisien (LREP), ont eu, dans ce cadre, l'opportunité de réaliser des essais en vraie grandeur sur le site expérimental de Guerville (Yvelines - 78). L'intervention de ces équipes a consisté à proposer et à tester des méthodes de caractérisation de la thixotropie sur chantier.

Dans cet article, les notions de rhéologie nécessaires à la compréhension du phénomène de thixotropie sont d'abord rappelées. Le chantier expérimental de Guerville, qui met en œuvre des coulages de voiles et de dalles en vraie grandeur, est ensuite décrit. Enfin, le programme d'essai réalisé pour la caractérisation de la thixotropie d'un BAP est présenté et les différents résultats recueillis sont analysés. L'objectif de ce travail n'est pas de proposer de façon définitive un protocole de caractérisation de la thixotropie, mais de présenter les résultats obtenus à partir de plusieurs types de mesures.

RHÉOLOGIE DES BAP : ÉTAT DE L'ART

Le comportement des bétons autoplaçants, comme celui de nombreuses autres suspensions de particules, peut être décrit par un modèle d'Hershel Bulckley [1, 2]. Celui-ci fait intervenir trois paramètres intrinsèques (τ_0 , k , n) qui permettent de décrire l'écoulement en régime permanent du matériau si celui-ci reste homogène (pas de ségrégation des particules). La contrainte de cisaillement τ (Pa) est alors reliée au taux de déformation $\dot{\gamma}$ (s^{-1}) par la relation suivante :

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

où τ_0 est le seuil de cisaillement du matériau et k un paramètre de viscosité. Si $n < 1$, le matériau est dit rhéo-fluidifiant ; si $n > 1$, le matériau est dit rhéo-épaississant ; si $n = 1$, le modèle est dit de Bingham. Ces paramètres sont accessibles à l'aide de rhéomètres à béton [3, 4] tels que le BTRhéom développé au LCPC [5] et adapté aux BAP par Sedran [6]. De Larrard et *al.* [7] ont montré que les bétons étaient, dans leur grande majorité, des matériaux rhéo-fluidifiants.

De plus, les agents viscosants entrant fréquemment dans la composition des bétons auto-plaçants accentuent le caractère thixotrope des bétons obtenus. Il peut être utile de rappeler ici la définition de la thixotropie donnée par le dictionnaire de Rhéologie [8]. Un corps est dit thixotrope si deux conditions sont remplies :

- ❶ après un long repos, τ (ou $\dot{\gamma}$) étant brusquement appliquée puis maintenue fixe, la viscosité apparente est fonction décroissante de la durée d'écoulement ;
- ❷ le corps retrouve son état initial après un repos assez long.

Cette évolution de la viscosité au cours du temps peut être expliquée par une diminution réversible de l'état de floculation (déstructuration) des particules de ciment soumises à un cisaillement. Au repos, cette floculation réapparaît et le matériau semble se figer (structuration). Dans la littérature, ce phénomène a tout d'abord été appelé « abnormal setting » (prise anormale) des bétons [9]. Il n'a cependant rien à voir avec un phénomène de prise puisque des matériaux telle que la bentonite présentent un comportement similaire sans pour autant subir de réaction d'hydratation. Ce phénomène a été récemment analysé, autant d'un point de vue qualitatif que quantitatif, par Jarny et *al.* [10] dans le cas de pâtes de ciment blanc.

La réversibilité du phénomène mérite que l'on s'y attarde. En effet, la viscosité apparente d'un béton auto-plaçant peut aussi évoluer au cours du temps sous l'effet d'une activation lente d'un adjuvant ou, à moyen terme, à cause du processus d'hydratation du ciment. Ces évolutions sont

irréversibles. Un simple malaxage suffisamment vigoureux peut « effacer » les conséquences d'un long temps de repos sur l'état de floculation d'un matériau alors qu'aucun malaxage ne peut inverser les réactions physico-chimiques. Dans l'étude du comportement des BAP, il est donc primordial de dissocier la thixotropie (phénomène réversible) du vieillissement (phénomène irréversible) [11].

La thixotropie n'affecte en rien l'étude du comportement en régime permanent, c'est-à-dire en écoulement établi des BAP (pompage, malaxage, écoulement dans une goulotte lors de la vidange d'un camion toupie), qui peut être décrit à l'aide du modèle d'Hershel-Bulkley. Elle doit cependant être prise en compte dans l'étude des régimes transitoires qui sont majoritaires lors des phases de mise en œuvre (remplissage d'un coffrage, coulage d'une dalle et même repos du matériau, pendant lequel l'état de floculation augmente).

Dans la pratique, les essais permettant de caractériser le comportement des BAP sont des essais de chantiers simples et peu coûteux sur lesquelles portent les recommandations provisoires de l'Association française de génie civil [12]. Celles-ci portent sur trois caractéristiques de ces matériaux :

- ① leur aptitude à remplir un coffrage, évaluée à l'aide de l'essai d'étalement au cône ;
- ② leur aptitude à franchir une zone ferrillée, évaluée à l'aide de l'essai à la L-Box ;
- ③ leur stabilité vis-à-vis de la ségrégation statique, évaluée à l'aide de l'essai au tamis.

Les deux premiers essais correspondent à des écoulements transitoires et sont donc affectés par la thixotropie. Le dernier essai concerne le caractère éventuellement hétérogène du matériau et ne fournit donc pas d'informations sur le comportement en écoulement du matériau lorsqu'il reste homogène. Finalement, une valeur d'étalement au cône comprise entre 600 et 750 mm et une valeur de L-Box comprise entre 0,8 et 1 sont les seules informations disponibles sur un chantier où un béton conforme aux recommandations provisoires de l'AFGC est mis en œuvre. Comme on le verra, ces deux valeurs sont insuffisantes pour décrire la palette des comportements possibles au vu de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu.

Il semble nécessaire de préciser ici quelques notions importantes pour la suite de ce travail. Comme indiqué dans la définition précédente, la thixotropie est l'association de deux phénomènes : une structuration (ou floculation) et une déstructuration (ou défloculation) sous écoulement. Physiquement, chacun de ces phénomènes peut être caractérisé par une amplitude et un temps caractéristique. Au moins quatre paramètres sont ainsi nécessaires pour décrire le caractère thixotrope d'un mélange (c'est d'ailleurs le nombre minimal de paramètres utilisé dans les modèles de thixotropie de la littérature [13]). La grande majorité des suspensions sont thixotropes. Un fluide à seuil simple peut être considéré comme un matériau thixotrope avec des temps caractéristiques de structuration et de déstructuration très courts. Ainsi, sa réponse à une sollicitation atteint très rapidement le régime permanent et semble ne pas dépendre de son histoire. De la même manière, tous les bétons sont thixotropes et, pourtant, dans la pratique, on parle de bétons thixotropes et de bétons qui ne le sont pas. La constatation suivante peut être faite : de manière générale (et de manière abusive) on appelle « béton thixotrope » un béton dont les amplitudes de structuration et de déstructuration sont grandes et associées à un temps caractéristique de structuration court et un temps caractéristique de déstructuration long.

CHANTIER EXPÉRIMENTAL DE GUERVILLE

Le chantier expérimental de Guerville fait partie du groupe C « Ouvrages expérimentaux » du projet national BAP. Les ouvrages réalisés sont des dalles et des voiles de grande hauteur. L'étude de l'influence de la thixotropie des BAP sur les pressions sur les coffrages de voiles de grandes hauteurs est un des objectifs de ce chantier. Pour cela, un programme expérimental en vraie grandeur a été mis en place. Une instrumentation adéquate permettant la mesure de la pression sur les coffrages de voiles a été installée et des BAP de formulations différentes ont été préparés en centrale et mis en œuvre sur le chantier. Le mode de remplissage de ces voiles (pompage ou injection) était aussi un paramètre d'étude. Les équipes du LCPC et du LREP sont intervenues dans le cadre du coulage des voiles 4, 5 et 6 et leur mission a été de quantifier, à l'aide d'essais adaptés, le caractère thixotrope des BAP mis en œuvre. Le tableau I résume l'organisation des coulages : la désignation des voiles, la désignation des formules, le mode de remplissage et leurs dates de mise en œuvre.

TABLEAU I
Description des bétons et des conditions de mise en œuvre.
Chantier expérimental de Guerville

Ouvrage	Désignation	Béton	Remplissage	Cubage (m ³)	Date
Voile 4	BAP25-PV4	B25	Vitesse max. (30 m ³ /h) Pompage	10,88	10/10/2003*
Voile 5	BAP25-PV5	B25	Vitesse max. (30 m ³ /h) Injection	10,88	15/10/2003
Voile 6	BAP25-PV6	B25 + changement d'adjuvantation	Vitesse max. (30 m ³ /h) Injection	10,88	20/10/2003

* Ce même jour un autre BAP qualifié de thixotrope par son formulateur (désigné par BAP40-centrale) a été testé dans une centrale de fabrication du béton. Les résultats obtenus sont également intégrés à cette étude.

MÉTHODES D'ESSAI PROPOSÉES ET ANALYSE

Un aspect de la thixotropie peut être quantifié via la mesure de l'évolution du seuil de mise en écoulement en fonction du temps de repos. Les bétons, comme toutes les suspensions à matrice cimentaire, laissés au repos ou soumis à des gradients de cisaillement très faibles, sont sujets à des phénomènes de structuration qui sont fonction des adjuvants et du ciment utilisés. Cette structuration a pour conséquence de « figer » le matériau, ce qui implique un effort de cisaillement plus important pour le mettre en écoulement. Ainsi, plus le temps de repos est grand, plus le matériau est « figé ». Le seuil de mise en écoulement augmente ainsi avec le temps de repos.

Un état de référence correspondant au matériau totalement destructuré est celui obtenu à la sortie du malaxeur. On peut, à cet instant, mesurer le seuil de mise en écoulement du béton qui est seulement fonction de sa composition (volume de pâte, taille et forme du squelette granulaire, nature de l'adjuvant) et de son malaxage. Ce seuil est une valeur intrinsèque du matériau fabriqué. Pour un temps de repos donné, c'est-à-dire pour un état de structuration (floculation) donné, ce même béton présentera un seuil de mise en écoulement différent du seuil d'écoulement initial. La différence entre ces deux valeurs de seuil est due, d'une part à la thixotropie et, d'autre part, au vieillissement éventuel du matériau.

Deux moyens d'évaluation de la structuration au repos due à la thixotropie ont donc été retenus pour les BAP du chantier de Guerville : une mesure d'étalement au cône d'Abrams et une mesure de seuil au repos à l'aide du rhéomètre à béton, le BTRhéom. Des mesures à t_0 (à la sortie de la toupie) et des mesures, effectuées au bout de différents temps de repos, sont alors réalisées parallèlement à l'aide des deux moyens de mesure.

L'autre aspect de la thixotropie qui ne peut être quantifié par la mesure de l'évolution dans le temps du seuil au repos est l'aptitude du matériau à se destructurer sous une vitesse d'écoulement donnée. En effet, comme le phénomène de thixotropie est réversible, le gain en seuil d'écoulement disparaît suite à un écoulement (remalaxage) suffisant du béton. Or, comme on le verra, l'évolution du seuil au repos se caractérise par une amplitude et un temps caractéristique, mais ne fournit aucune information sur l'aptitude à se destructurer du matériau.

Mesure du seuil au repos

Mesure du seuil au repos à l'aide du BTRhéom

Le rhéomètre à béton développé au LCPC est traditionnellement utilisé pour étudier le comportement rhéologique des bétons de consistance très plastique à fluide [6]. Dans le cadre de ce travail, il est exploité pour mesurer un seuil de mise en écoulement. Un protocole de mesure au seuil de repos avait été mis en place par Hu [5]. Le principe consistait à solliciter un béton au repos dans la cuve de l'appareil à une vitesse de rotation basse, mais croissante jusqu'à la mise en mouvement de l'outil de mesure à une vitesse de rotation fixée. Le couple de rotation était alors mesuré et traduit en terme de contrainte de cisaillement. Ce protocole était défini à l'origine pour tester des bétons plastiques. En présence d'un BAP, ce protocole n'est pas adapté pour la mesure d'un seuil de mise

en écoulement. Pour adapter le BTRhéom aux BAP, des modifications ont été apportées et introduites dans le logiciel de pilotage de l'appareil, ADRHEO. Les modifications sont les suivantes :

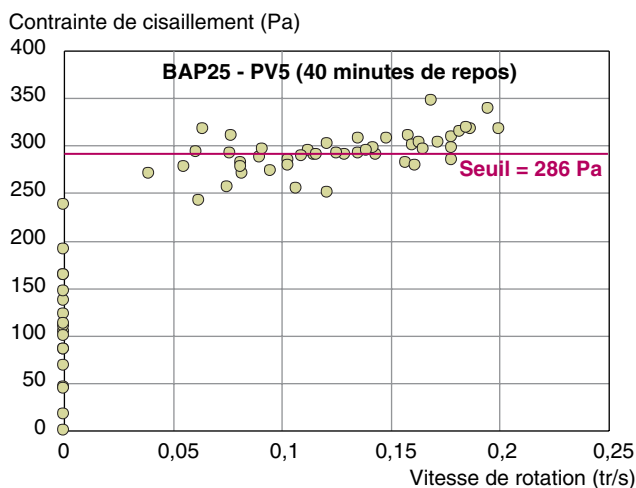
- suppression de la vibration pour la mise en place du béton dans la cuve du rhéomètre : il est inutile de vibrer un BAP pour le mettre en place dans le BTRhéom et une vibration risque de créer une ségrégation des plus gros grains au fond de la cuve ;
- temps d'acquisition d'un point ramené à 10 s au lieu de 20 s afin d'augmenter la précision lors du démarrage de l'écoulement ;
- vitesse de rotation maximale limitée à 0,2 tr/s pour limiter la destruction du béton. Cette limitation de vitesse permet de se rapprocher des conditions d'un béton non remanié pour les essais suivants et de réaliser tous les essais consécutivement sur la même cuve.

La réponse obtenue avec ce protocole de mesure de seuil au repos est présentée sur la figure 1 dans le cas du BAP25-PV5. Pour ce béton, avec un temps de repos avant essai de 40 min, l'écoulement démarre lorsque la contrainte est supérieure à une valeur moyenne de 286 Pa avec une erreur de ± 50 Pa. La vitesse de rotation augmente alors jusqu'à 0,2 tr/s et l'arrêt de l'essai. Le protocole est réalisé après différents temps de repos et les seuils mesurés sont indiqués sur la figure 2 pour les différents BAP testés. Il apparaît globalement une augmentation du seuil quand le temps de repos augmente, ce qui traduit la capacité de structuration de ces bétons si l'on suppose que leur vieillissement peut être négligé devant la thixotropie. La structuration semble se stabiliser au bout de 20 min dans le cas des BAP25-PV4, BAP25-PV5 et BAP25-PV6 (la fluctuation autour de la valeur moyenne mesurée est approximativement ± 50 Pa). Notons que, dans le cas du BAP40-centrale, dont la fluctuation autour de la valeur moyenne mesurée est approximativement ± 20 Pa, les mesures de seuil s'arrêtent au bout de 23 min à cause de problèmes d'alimentations électriques sur site. De plus, les essais ont été réalisés à la sortie du malaxeur de la centrale et non pas à la sortie du camion toupie. L'état de structuration du matériau est probablement beaucoup plus faible grâce à la forte capacité de malaxage de la centrale, ce qui explique les seuils d'écoulement quasiment nuls mesurés. En effet, la vitesse de cisaillement imposée au matériau pendant le transport (camion toupie) est largement inférieure à la vitesse de cisaillement imposée lors du malaxage. Ainsi, lors de la phase de transport qui précède les essais sur BAP25-PV4, BAP25-PV5 et BAP25-PV6, le béton subit une forme de structuration sous cisaillement lent. Son état de structuration à la livraison sur chantier est ainsi plus élevé qu'à la sortie de la centrale. L'état de structuration initial faible du BAP-40 centrale engendre un gain en seuil important et rapide.

Il est alors possible de quantifier l'amplitude de la structuration au repos de ces bétons en calculant le rapport du seuil d'écoulement mesuré après un temps de repos t ($\tau_0(t)$) au seuil mesuré à t_0 ($\tau_0(0)$). Les différentes valeurs calculées sont indiquées dans le tableau II.

Dans ces conditions, ces rapports de seuil au repos ne permettent pas de distinguer la part liée à la thixotropie du matériau de celle liée à un vieillissement. Quelques remarques additionnelles sur ces essais peuvent être faites :

- le dépouillement traditionnel des essais sur BTRHEOM est fondé sur l'hypothèse qu'une couche de glissement se forme sur les parois de l'appareil. La contribution au couple mesuré du cisaillement

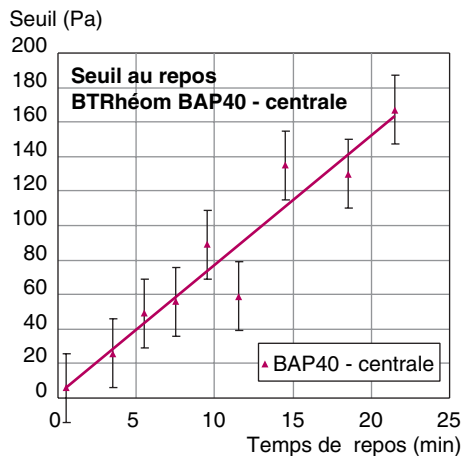
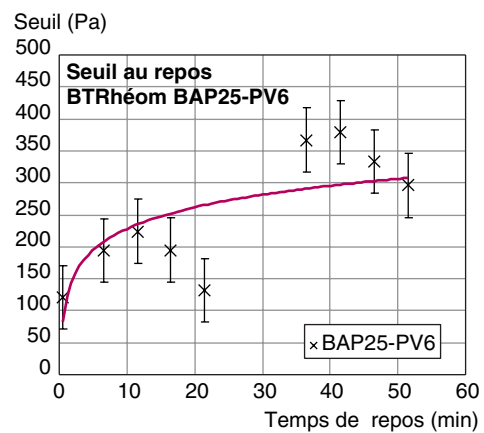
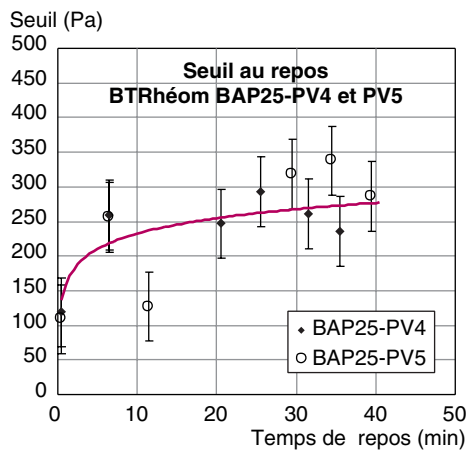


□ **Figure 1**
Exemple d'un enregistrement obtenu avec le protocole de mesure de seuil au repos à l'aide du BTRhéom (BAP25-PV5 après 40 min de repos).

TABLEAU II
Amplitude de structuration évaluée à l'aide du BTRhéom

Bétons	Rapport $\tau_0(t)/\tau_0(0)$		
	0 min	5 min	30 min
Temps de repos	0 min	5 min	30 min
BAP25-PV4	1	2	2
BAP25-PV5	1	2	3
BAP25-PV6	1	2	3
BAP40- centrale	1	8	28*

* Ce rapport n'est pas calculé à $t = 30$ min, mais à $t = 23$ min, dernière valeur mesurée pour ce béton.



□ **Figure 2**

Évolution du seuil au repos des BAP en fonction du temps de repos.

Les fluctuations autour de chaque mesure sont également représentées.

a - BAP25-PV4 et PV5.

b - BAP25-PV6.

c - BAP40-centrale.

à la paroi est donc négligée devant le cisaillement imposé au matériau. Cette hypothèse, totalement justifiée dans le cas des bétons traditionnels à seuil élevé, est probablement à remettre en cause dans le cas de bétons aussi fluides que les BAP. Les seuils d'écoulement mesurés sur la figure 2 sont donc probablement supérieurs aux seuils réels du matériau ;

➤ les fluctuations autour des valeurs moyennes de seuil sont importantes (50 Pa) pour des valeurs mesurées comprises entre 0 et 400 Pa, ce qui ne permet pas une analyse rigoureuse des cinétiques d'augmentation du seuil en fonction du temps de repos ;

➤ il est à noter que, les essais étant réalisés consécutivement sur une même cuve, il n'est pas exclu qu'une déstructuration survienne à chaque mesure et que l'évolution du seuil au repos soit perturbée par les petites rotations de l'appareil nécessaires aux mesures successives ;

➤ les BAP25-PV4 et BAP25-PV5 présentent une structuration équivalente à 5 min. Un écart apparaît cependant à 30 min entre ces deux bétons de formulation identique. On y reviendra plus loin.

Essai d'étalement aux cônes

La mesure de l'étalement au cône d'Abrams est un moyen d'appréciation et de contrôle sur chantier de la capacité d'un béton autoplaçant à se mettre en place. Le diamètre de la galette de béton formée sur la plaque après soulèvement du moule conique est mesuré [12] (Fig. 3). Il est important de se rappeler que, dans le cas d'un fluide à seuil simple, cet étalement est d'autant plus grand que le seuil d'écoulement du matériau est faible [14].

Le protocole de mesure proposé pour évaluer la thixotropie des BAP mis en œuvre consiste à faire sept mesures d'étalement après des temps de repos de 0, 5, 10, 15, 20, 30 et 60 min. Les sept moules coniques sont ainsi tous remplis à t_0 (béton prélevé juste à la sortie de la toupie du camion malaxeur ou du malaxeur pour le BAP40-centrale) et soulevés successivement. Les valeurs des étalements sont mesurées en fonction du temps de repos.

Le protocole ainsi défini suppose qu'il n'y a pas de vieillissement du béton entre deux mesures et que la variation du seuil en fonction du temps de repos est uniquement due au phénomène de structuration induit par la thixotropie.

De plus, la valeur mesurée n'est qu'une valeur « résiduelle » de l'état de structuration qui s'était développé dans le cône avant son soulèvement. En effet, pendant l'étalement, le matériau se déstructure partiellement en s'écoulant. L'étalement mesuré n'est donc le reflet que d'un seuil résiduel. Il est à noter que, dans ces conditions, la vitesse de soulèvement du cône, puisqu'elle conditionne la vitesse de l'écoulement et donc la déstructuration, devient un paramètre important de l'essai. Une attention particulière a donc été portée à ce point, notamment en privilégiant la réalisation de l'essai d'étalement par un seul et même opérateur.

Les étalements mesurés au cône sur l'ensemble des bétons se situent entre 600 mm et 800 mm. Ils sont donnés pour les différents bétons sur la figure 4. On constate que l'étalement diminue quand le temps de repos augmente et donc que le seuil résiduel augmente avec le temps de repos, démontrant ainsi que l'écoulement d'étalement au cône ne suffit pas à « casser » totalement le niveau de structuration atteint pendant le repos.

Une différence apparaît encore entre le BAP25-PV4 et le BAP25-PV5, pourtant de formulation identique. Cependant, les incertitudes de mesure dans ce protocole et dans le précédent sont importantes par rapport à la différence observée. De plus, l'étalement des deux bétons à leur arrivée diffère. Cela est en accord avec une teneur en eau plus faible dans le cas du BAP25-PV5, annoncée effectivement par la centrale de fabrication.

La cinétique de diminution de l'étalement peut différer d'une formule de BAP à une autre. On constate par exemple que, pour les BAP25-PV4 et BAP25-PV6, la perte d'étalement après une heure



□ **Figure 3**
Mesure de l'étalement d'un BAP
au cône d'Abrams.

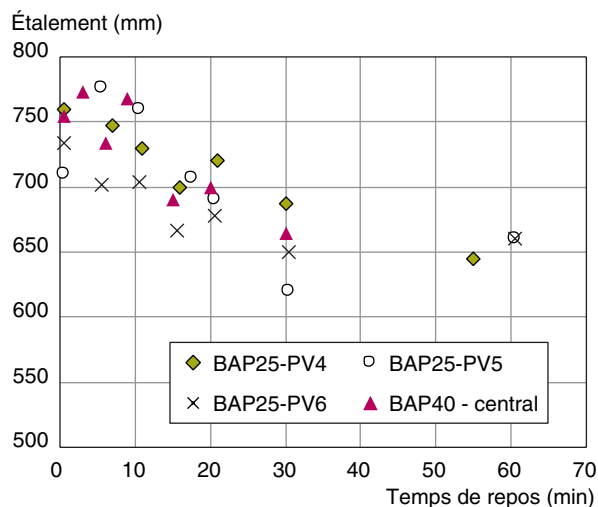
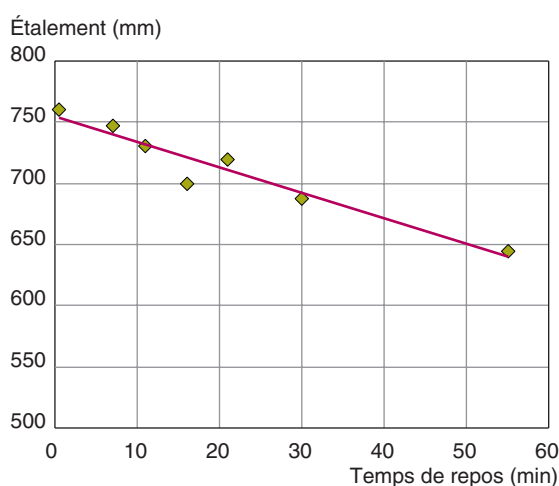
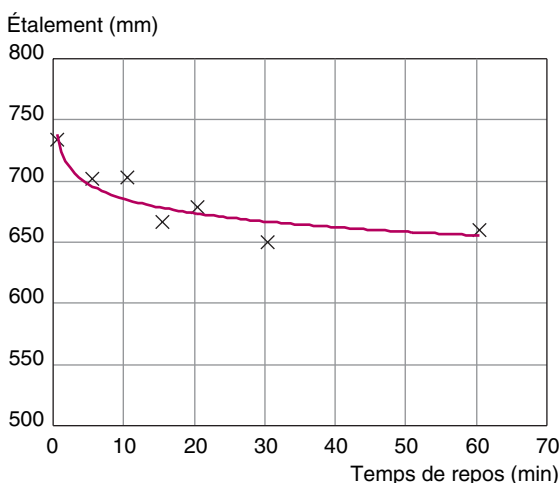


Figure 4
Étalements au cône d'Abrams
en fonction du temps de repos.



a

Figure 5
Illustration de la cinétique
de structuration.
a - BAP25-PV4.
b - BAP25-PV6.



b

de repos est la même (Fig. 5), mais que la cinétique de cette perte est différente (cf. Fig. 5a et 5b). Ainsi, l'amplitude de la structuration au repos ne suffirait pas à décrire seule le comportement thixotrope d'un béton.

La dénomination utilisée pour le BAP25-PV6 pendant le chantier expérimental était celle de béton « plus thixotrope ». En fait, ce matériau ne se fige pas davantage, mais semble par contre se figer plus rapidement. Comme déjà évoqué, un temps caractéristique de structuration est donc nécessaire pour compléter la description de cet aspect du phénomène de thixotropie.

Il peut être noté que là où le BTRhéom fournit des mesures comprises entre 0 et 400 Pa, la mesure de l'étalement fournit, quant à elle, des valeurs comprises entre 640 et 760 mm. Un gain de seuil de 100 % correspond ainsi approximativement, dans la plage de comportement étudiée, à une perte d'étalement de 10 cm. La bonne répétabilité de la mesure de l'étalement permet de mettre en évidence des différences de cinétique de structuration comme illustré par la figure 5. Cependant, pour le BAP 40-centrale, qui présente un seuil initial mesuré au BTRhéom largement inférieur aux autres bétons (en fait quasiment nul), un étalement équivalent est obtenu (750 mm). On peut toutefois s'interroger sur la signification de l'essai d'étalement pour des BAP très fluides. L'épaisseur de la galette étant du même ordre que la taille des granulats, ne serait-on pas en train de mesurer une grandeur caractéristique de la pâte de ciment plutôt que du béton en tant que matériau homogène ?

Détermination de courbes d'écoulement à l'aide du BTRhéom

Parallèlement aux mesures de seuil au repos, des essais à vitesse de rotation croissante suivis d'essais à vitesse décroissante ont été réalisés sur ces bétons avec le BTRhéom. Les rhéogrammes obtenus, exprimés dans un repère couple-vitesse de rotation, permettent d'identifier à la fois le comportement du matériau et l'influence de la thixotropie. Cela peut être expliqué à l'aide de la figure 6, qui décrit schématiquement les phases successives de l'essai.

On suppose que l'essai est réalisé sur un béton ayant subi un repos et présentant un « niveau » de structuration préalable à la mise en rotation du BTRhéom.

- [a, b] : la courbe de montée en vitesse présente un pic au début de l'essai qui traduit une déstructuration du béton. La mise en rotation de l'appareil de mesure peut être assimilée à un remalaxage de l'échantillon qui s'était reposé et nécessite de ce fait un couple initial élevé. Ce couple est à associer à la mesure d'un seuil au repos τ_0^D . Au cours de cette phase, la déstructuration peut l'emporter sur l'augmentation de la vitesse de rotation de l'appareil et la courbe de mesure du couple est alors décroissante. C'est le cas sur la figure 6. Au point b, le gain de structuration au repos du matériau a totalement disparu.
 - [b, c] : on peut supposer que la déstructuration ayant eu lieu pendant [a, b] a effacé toute manifestation du comportement thixotrope et toute trace de l'histoire du matériau. Seul son comportement intrinsèque est alors mesuré et le couple croît logiquement avec la vitesse de rotation. Au point c, la vitesse maximale de l'essai est atteinte et la phase de mesure en vitesse décroissante commence.
 - [c, d] : la vitesse maximale atteinte au point c (3 tr/s) assure *a priori* un remalaxage complet du béton. L'extrapolation de cette partie de courbe fournit une valeur du seuil intrinsèque du matériau τ_0^R s'il n'y a pas de vieillissement. Les paramètres d'un modèle d'Herschel Bulkley peuvent être identifiés. Sur la figure 6, l'aspect linéaire de la réponse est caractéristique d'une valeur $n = 1$ (modèle de Bingham). La pente de la droite contrainte/déformation est alors appelée viscosité plastique. En théorie, pour des vitesses de rotation faibles, le matériau pourrait présenter une restructuration sous écoulement lent. Cela n'apparaît pas en général avec les mesures sur bétons car le temps caractéristique de ce phénomène est largement supérieur à la durée de l'essai au BTRhéom. La tradition est cependant d'appeler les courbes de descente en vitesse des courbes de restructuration.
- En pratique, la vitesse de rotation imposée par le BTRhéom est souvent suffisante pour que la déstructuration soit totale et les branches [b, c] et [c, d] se superposent effectivement.

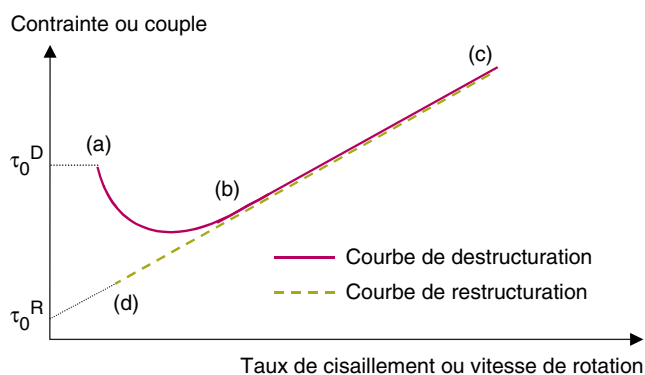
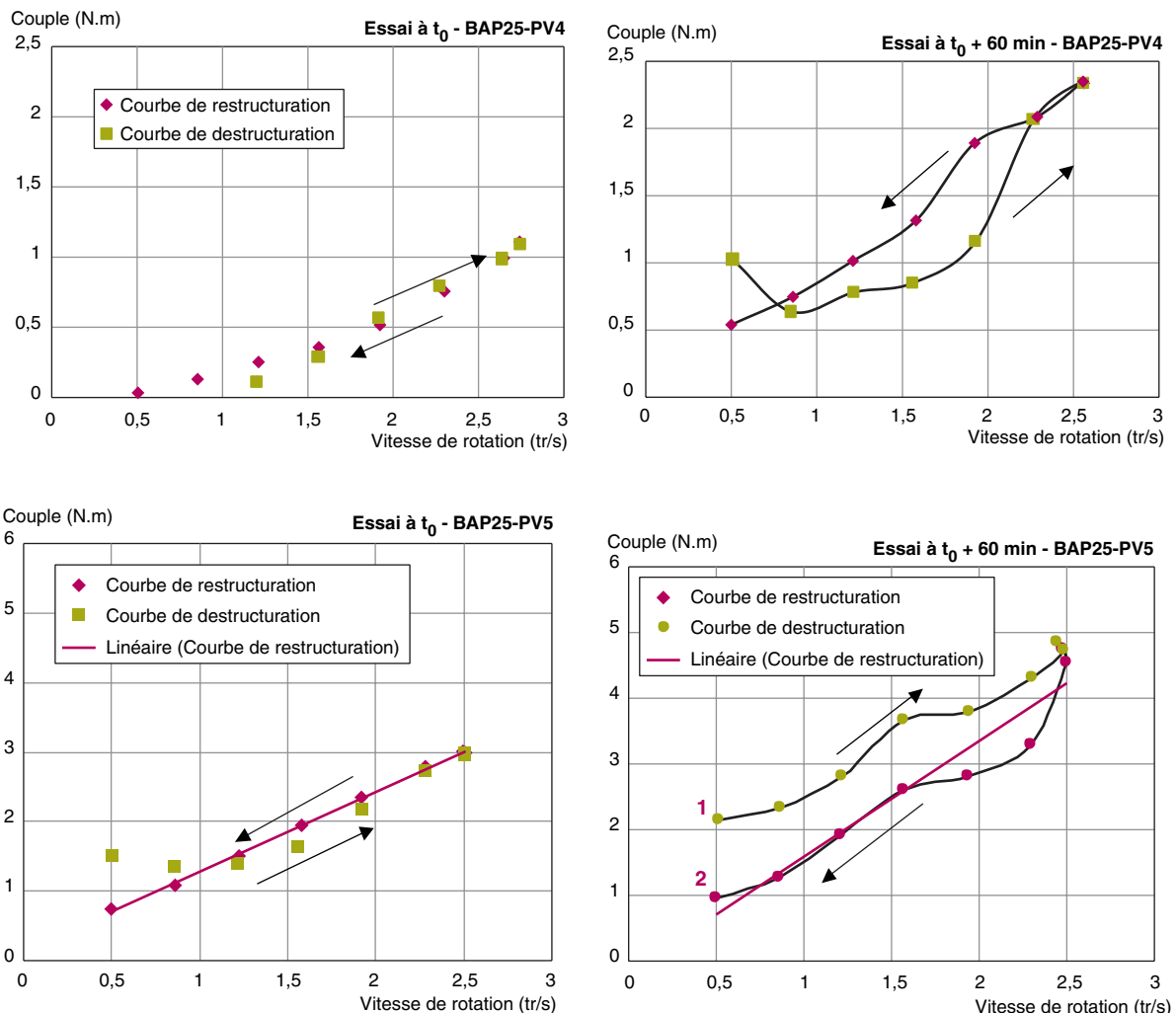


Figure 6
Allure des courbes rhéologiques des bétons testés.

Ce type de protocole permet donc de quantifier la structuration due à la thixotropie et, s'il est effectué à deux âges du béton, il permet de constater s'il y a vieillissement (augmentation de la viscosité plastique) ou rajeunissement du matériau (diminution de la viscosité plastique) ou bien maintien de la rhéologie (viscosité inchangé).

Dans le cas des BAP testés, ce type d'essais a été réalisé à t_0 (béton prélevé à la sortie de la toupie du camion malaxeur ou du malaxeur de la centrale) et à $t_0 + 60$ min. Les courbes obtenues pour les différents bétons sont données sur la figure 7. On retrouve les différents phénomènes qui viennent d'être décrits. Un vieillissement, qui sera confirmé plus loin, vient perturber l'essai à 60 min dans le cas du BAP25-PV4.

Il est ainsi possible de quantifier un effet de structuration du matériau en calculant le rapport entre τ_0^D à $t_0 + 60$ min de repos (point 1 sur la figure 7b) et τ_0^R à $t_0 + 60$ min (point 2 sur la figure 7b). Ce rapport, que l'on nommera « indice de structuration », est arrondi à l'unité la plus proche et peut être supérieur à 1 (matériau structurant) ou à la limite égal à 1 (matériau non structurant). Par ailleurs, le vieillissement ou le rajeunissement du matériau est évalué à l'aide du rapport entre la pente de la droite de corrélation couple-vitesse en restructuration à $t_0 + 60$ min et à t_0 nommé « indice de vieillissement » (cf. régressions linéaires sur la figure 7b). On définit ici le matériau comme vieillissant si cet indice est supérieur à 1, rajeunissant dans le cas où il est inférieur à 1 et stable s'il est égal à 1. Un vieillissement correspond donc à une augmentation de la viscosité plastique du béton. Il est à noter que la précision obtenue dans le calcul de cet indice est relativement faible. Il reste

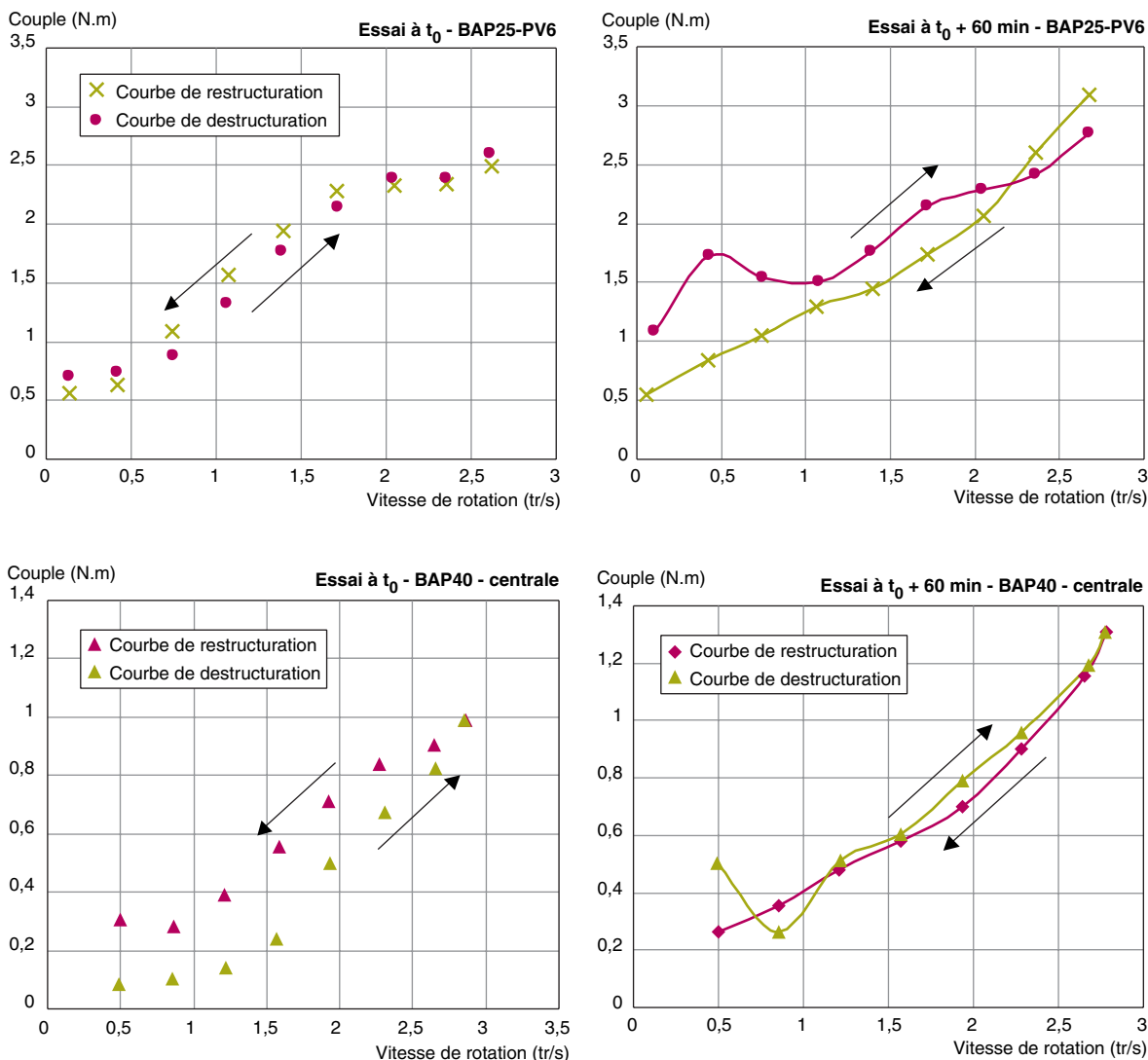


□ Figure 7

Courbes « couple-vitesse » des BAP testés à deux échéances de temps.

a - BAP25-PV4 (haut) essai à t_0 - (bas) essai à $t_0 + 60$ min.

b - BAP25-PV5 (haut) essai à t_0 - (bas) essai à $t_0 + 60$ min.



□ **Figure 7 (suite)**
 c - BAP25-PV6 (haut) essai à t_0 - (bas) essai à $t_0 + 60$ min.
 d - BAP40-Centrale (haut) essai à t_0 - (bas) essai à $t_0 + 60$ min.

cependant représentatif des changements que le matériau subit au cours du temps et qu'un malaxage ne pourra effacer.

Le tableau III présente les valeurs de ces différents rapports. On constate que tous les BAP testés présentent un caractère structurant équivalent (cf. Fig. 7) et que le BAP25-PV4 est le plus vieillissant.

TABLEAU III
 Paramètres caractéristiques du comportement des BAP testés

Bétons	Indice de structuration	Indice de vieillissement	Qualification
	$\tau_0^D(60)/\tau_0^R(60)$	Pente(60)/pente(0)	
BAP25-PV4	2	2	Structurant, vieillissant
BAP25-PV5	2	1,5	Structurant, légèrement vieillissant
BAP25-PV6	2	1	Structurant, stable
BAP40-centrale	2	1,5	Structurant, légèrement vieillissant

Les différences entre BAP25-PV4 et BAP25-PV5 notées précédemment apparaissent ici aussi même si l'âge des deux bétons au moment des essais est le même : livraison sur chantier 50 min après leur fabrication et fin des essais 1 heure et 20 min plus tard. Cependant, la température du béton mesurée à sa livraison sur le chantier était de 20 °C pour le BAP25-PV4 et de 17 °C pour le BAP25-PV5. Il est fort probable que les processus chimiques ont commencé plus tôt dans le cas du BAP25-PV4, provoquant ainsi un changement irréversible de son comportement.

BILAN DES PROTOCOLES TESTÉS

Le **protocole de mesure de seuil au repos** permet de quantifier l'évolution du matériau sans pouvoir dissocier vieillissement et thixotropie. De plus, la dispersion des mesures est trop forte pour pouvoir identifier des différences de cinétique de structuration. Enfin, les rotations nécessaires aux mesures successives effectuées sur le même échantillon induisent une perturbation difficilement quantifiable sans modification du protocole (utilisation de plusieurs cuves de rhéomètre ?).

La **mesure des étalements** après différents temps de repos semble présenter une dispersion moindre et permettre ainsi une étude de la cinétique des phénomènes mis en jeu. Cependant, l'écoulement perturbe là aussi la mesure et ne permet de quantifier qu'un effet résiduel de la structuration sans pouvoir le dissocier du vieillissement. Il serait tout de même possible de combler cette dernière lacune par un essai d'étalement à 60 min sur un échantillon de béton rebrassé dans le camion toupie. Sans repos, sa variation de seuil serait uniquement due au vieillissement du matériau. L'appareil est peu coûteux, mais ce protocole (sept cônes à remplir) est plus lourd à mettre en œuvre.

Enfin, le **protocole de montée-descente au BTRhéom** permet de quantifier, en les dissociant, la part de structuration et la part de vieillissement. Il ne fournit cependant qu'une seule valeur de seuil après un repos de 60 min puisqu'un essai complet remalaxe entièrement l'échantillon. C'est toutefois le protocole le plus convaincant de ceux testés.

En combinant les deux protocoles utilisant le BTRhéom, il est cependant possible d'avoir accès à quasiment la totalité des informations nécessaires à une caractérisation complète du comportement rhéologique du béton avant sa prise. Des essais supplémentaires seront toutefois nécessaires avant de pouvoir définir un protocole d'essai définitif.

26

CONCLUSION

Les essais proposés dans cette étude ont permis de caractériser et de quantifier la thixotropie de formules de BAP préparées en centrales et mises en œuvre pour le coulage de voiles. Les résultats ont mis en évidence l'existence d'un phénomène de structuration dû à la thixotropie « d'amplitude » plus ou moins marquée pour toutes les formules testées. Il apparaît également que « l'amplitude » de structuration seule n'est pas suffisante pour maîtriser les variations de rhéologie des BAP pendant leur mise en œuvre, mais que la cinétique d'évolution du phénomène est aussi un indicateur important.

Selon les protocoles d'essai adoptés, la part « structuration » peut être dissociée ou pas de la part « vieillissement » du matériau. Des indices permettant de quantifier les deux phénomènes ont été définis et analysés pour les différents essais proposés.

Ce travail constitue, dans la continuité du travail de Th. Sedran, une étape supplémentaire vers l'adaptation du BTRhéom aux BAP et son utilisation pour la mesure de phénomènes transitoires tels que la thixotropie et le vieillissement des bétons frais.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] HERSCHEL W.M., BULCKLEY R., Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions, *Proc. Amer. Soc., Testing Materials*, **26 (II)**, 1926, pp. 621-634.
- [2] COUSSOT Ph., ANCEY C., *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*, EDP Sciences, 1999.
- [3] FERRARIS C.-F. and al., *Comparison of concrete rheometers : international test at LCPC*, Nantes, Rapport du NIST, octobre 2000.
- [4] FERRARIS C.-F., De LARRARD F., *Comparison of concrete rheometers : international tests at MBT*, May 2003, Rapport du NIST, Mai 2003.

- [5] De LARRARD F., SEDRAN Th., HU C., Conception d'un rhéomètre pour bétons fluides, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 215, juillet-août 1993, pp. 55-59.
- [6] SEDRAN Th., *Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons auto-nivelants*, thèse ENPC, mars 1999.
- [7] De LARRARD F., FERRARIS C.-F., SEDRAN Th., Fresh concrete : a Herschel-Bulckley material, Technical note, *Materials and Structure*, 31 (211), 1998, pp. 494-498.
- [8] *Dictionnaire de Rhéologie*, édité par le Groupe Français de Rhéologie, 1990, p. 44.
- [9] KALOUSEK G.L., A new instrument for measuring thixotropy, *Cement and Concrete Research*, 3, 1973, pp. 315-323.
- [10] JARNY S., ROUSSEL N., BERTRAND F., RODTS S., HUYNH H.T., TOSQUER L., LE ROY R., COUSSOT Ph., Thixotropie des pâtes cimentaires, *JSI 2003, journées des sciences de l'ingénieur du réseau des laboratoires des ponts et chaussées*, Dourdan, France, 9-11 décembre 2003 (collection : actes des journées scientifiques du LCPC).
- [11] GELADE P., *Stabilité et comportement rhéologique des coulis d'injection pour gaine de précontrainte*, thèse Paris VII, 2001.
- [12] *Bétons Auto-plaçants – recommandations provisoires de l'AFGC*, juin 2000.
- [13] ROUSSEL N., LE ROY R., COUSSOT Ph., Thixotropy modelling at local and macroscopic scales, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 117, 2004, pp. 85-95.
- [14] ROUSSEL N., COUSSOT Ph., « Fifty-cent rheometer » for yield stress measurements : from slump to spreading flow, *J. of Rheology*, 49 (3), 2005, pp. 705-718.

